利用潛熱通量資料驗證水稻田蒸發散模式

陳述[1]、姚銘輝[2*]、陳守泓[2]
[1]行政院農委會農業試驗所種原組
[2]行政院農委會農業試驗所農工組

摘要

決定水稻的需水量對灌溉計畫非常重要。本研究利用水汽量測系統量測蒸發散量構成因子，以估算水稻田實測資料並以評估四種估算潛勢能蒸發散模式之準確度。結果顯示，以溫度為輸入值之 Hargreaves and Samanni 法高估蒸發散量，相反的，以輻射量為輸入值之 Miakkink 法則低估，Penman-Monteith 法和其簡化方程式(Priestley-Taylor method 法)則較能符合實測值。除此之外，本研究另一目的即利用蒸發散量實測值及氣象資料發展出適合之水稻作物係數，以 Penman-Monteith 方法估測潛能蒸發散量，比較由水汽量測系統所量測之實測值。結果顯示，水稻一期作之四個生育時期(幼苗期、分蘗期、抽穗期及成熟期)之作物係數，分別為 0.92、1.00、1.13 及 0.89；二期作則為 1.01、1.11、1.23 及 0.93。

關鍵詞：水稻、蒸發散量、水汽量測系統、作物係數。

Using Latent Heat Flux Data to Validate Evapotranspiration Models Used for Paddy Field

Shu Chen[1], Ming-Hwi Yao[2*] and Shou-Hung Chen[2]

* 通信作者, mhyao@wufeng.tari.gov.tw

投稿日期：2007 年 12 月 25 日
接受日期：2008 年 1 月 18 日
作物、環境與生物資訊 5:29-39 (2008)
Crop, Environment & Bioinformatics 5:29-39 (2008)

189 Chung-Cheng Rd., Wufeng, Taichung Hsien 41301, Taiwan ROC

1 Plant Germplasm Division, Agricultural Research Institute, COA, Wufeng, Taichung Hsien 41301, Taiwan ROC
2 Agricultural Engineering Division, Agricultural Research Institute, COA, Wufeng, Taichung Hsien 41301, Taiwan ROC

ABSTRACT

Determining water requirement of rice is important for paddy field irrigation plan. The objectives of this study were to measure evapotranspiration with eddy correlation system, and to validate four empirical equations of potential evaportranspiration by comparing the model's estimated values to calculated values of latent heat flux from paddy field. The results showed that evaportranspiration was overestimated by Hargreaves and Samanni method based only on temperature as input. On the other hand, evaportranspiration was underestimated by Makkink method based only on solar radiation as input. The Penman-Monteith method and its derived simplified form (Priestley-Taylor method) gave better fitted to the actual measured values. Moreover, the crop coefficient (kc) was developed from crop evaportranspiration (ETc) calculations and weather data. The reference/potential evapo- transpiration (ETo) estimated by Penman- Monteith method were compared with the calculated value of ETc from eddy correlation system. Results indicated that the crop coefficients suitable for first season rice crop in the four growth stages, namely, seedling, tilling, heading and maturity, were 0.92, 1.00, 1.13 and 0.89, respectively. The coefficients suitable for the second season rice crop were 1.01, 1.11, 1.23 and 0.93, respectively.

Key words: Rice (*Oryza sativa*), Evapotranspiration, Eddy correlation system, Crop coefficient.

前言

傳統農業遭受最多批評之處，在於使用與產值不成比例的自然資源，包括土地及水資源。水稻田是我國農田佔地最大，同時也是水資源利用最多之作物田區。水田需水量常用模式去估算，但缺乏實際測值，尤其是使用旱田的蒸發散模式容易錯估水田的實際蒸發散值，造成灌溉管理的困擾，影響水源分配且可能造成政策制訂上的盲點。因此，針對水稻田每一生育期實際耗水進行測量，對需水量提出正確數據，並且透過實測資料驗證各種蒸散量模式，以得到最佳估算方式，日後將可據以利用氣象資料對大面積稻田進行估算，提升水資源的精準分配及使用。

蒸發散量測方法很多，包括土壤水分平衡法、設置稱重型滲透計(lysimeter)、測定植物含水勢能、或是由氣象因子代入模式估算等，惟上述方法都有使用上的限制，包括無法直接觀測或觀測點不可任意移動等。利用水汽通量(vapor flux)則適度克服這些限制，精確的量測瞬時蒸發散量(Scott *et al.* 2003)。水汽量測系統之通量值是由垂直風速及絕對濕度之互變異數(covariance)所計算之潛熱(latent heat)，經單位換算即等於作物群落上方之蒸發散量(evapotranspiration) (Brutsaert 1982)。由於該系統建立於簡單的理論基礎，不需要配合其他地表自然因子(地表粗糙度)大氣因子(大氣穩定度)，可作為蒸發散量實測值及模式驗證的基本資料。然而，利用共變異數方式計算通量的觀念雖然很早就被提出(Swinbank 1951)，但在當時因儀器上的限制，很難進行實際量測工作。最近十幾年來，由於儀器感測技術及電腦運算與儲存速度大幅提昇，才能發展成具有實測功能的系統，應用範圍包括蒸發散量測(Kosugi *et al.* 2007)、潛熱或可感熱的傳送(Prueger *et al.* 1998)及二氧化碳吸存量評估(Dugas *et al.* 1999)等工作。

作物群落上方之蒸發散量包括土面蒸發及葉片蒸散，一般蒸發散模式係估算潛勢能蒸散量(reference evapotranspiration；ET_0)，即在充分水分供應下之最大蒸發散量。蒸發散模式係依據氣象因素作估算，包括利用溫度、輻射能、能量平衡、水分平衡(water budget)或質量傳遞(mass-transfer)等不同方法，而其中 Penman-Monteith 方程式是受國際性機構唯一認可推薦之蒸發散估算模式(Allen *et al.* 1998)。雖然 Penman- Monteith 模式在估算蒸發散上有不錯的評價，但所需參數較多，尤其是風速函數易受區域性環境影響，同時氣象測站也較少有此項資料。因此，利用其他單一氣象因素作估算亦值得探討，包括利用輻射能估算之 Makkink 法(1957)，以溫度估算之 Hargreaves and Samani 法(1982)，以及 Priestley and Taylor (1972)簡化 Penman- Monteith 模式所提出之空氣動力學和能量平衡聯立的綜合法。

觀測值為點資料，僅能代表量測當時的實測值，仍需透過經校驗後之估算模式，才能對大面積農田進行估算用水量。估算時，作物係數(crop coefficient；kc)是一重要參數，該數值是由作物實測蒸散量(crop evapotranspiration；ET_C)和由氣象資料所估算之潛勢能蒸散量的比值。Allen *et al.*, (1990)認為各種作物之作物係數應依據各地氣候條件建立經驗值。雖然已經有研究探討不同氣候條件下之作物係數(Doorenbose and Pruitt 1977)，但每一作物種類或栽培環境皆應有其特定之數值，因作物係數是直接受作物特性和所處環境所影響。

國內曾有針對不同蒸發散模式進行探討之研究報告(Kan *et al.* 1996, Liang *et al.* 1997, Yeh *et al.* 2005)，但皆由氣象站觀測資料為分析依據，缺乏田間實測值作驗證。本研究目的係利用水汽量測系統，直接量測水稻田之潛熱通量作為瞬間蒸發散量，並驗證多種蒸發散模式之預測能力，以建立水稻之作物係數，作為稻田水資源利用的參考依據。

材料與方法

一、田間觀測及水稻生育調查

通量觀測試驗於 2007 年一期作進行，地點為行政院農委會農業試驗所溪口農場之水稻試區，試區面積約為 2 公頃，此塊田區栽種品種為臺農 71 號，行株距 15×30 公分，基肥施用臺肥 39 號每公頃 400 公斤，第一次追肥施用臺肥 1 號每公頃 160 公斤，穗肥施用硫酸銨每公頃 160 公斤，並依據田間實際情形進行病蟲害及雜草管理。由於蒸發散與水稻生育期之葉面積指數(leaf area index; LAI)有關，本研究水稻葉面積是利用植冠分析儀(Licor 2000, Licor Inc., Lincoln, NE, USA)所量測，從水稻移植起固定每週至田區量測一次。儀器準確性之驗證是利用破壞性葉面積資料作比對，資料來源為農業試驗所之水稻豐歉試驗資料。每週取 20 叢稻株，將綠色葉片摘取下來，以葉面積分析儀(Licor 3000, Licor Inc., Lincoln, NE, USA) 分析每叢之葉面積，再依行株距計算出葉面積指數。利用植冠分析儀(Y)及葉面積儀(X)所做結果的相關係數為 0.71(Y = -1.18+1.10X)，而在本研究中葉面積指數是指以植冠分析儀的數據為主。

二、水汽量測系統的建立及儀器配置

1. 三維音波風速計(three dimensional sonic anemometer)：Young 81000 (R.M.Young Company, Traverse city, MI, USA)，輸出速度為 4-32 Hz。
2. 開放式二氧化碳/水汽分析儀(open path CO_2 / H_2O analyzer)：LICOR-7500 (Licor Inc., Lincoln, NE, USA)，最高反應頻率為 20 Hz。
3. 細熱電偶線(fine wire thermocouple)：Campbell 公司推薦所使用之熱電偶線之線徑為 12.7 μm，反應頻率大於 30Hz，以此線徑可得到最小輻射負載(radiation loading)(Tanner 1979)。
4. 土壤濕度計(soil moisture probe)：CS615 (Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA)。
5. 土溫計(soil temperature sensor)：T type 熱電偶線(Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA)。
6. 淨輻射計(net radiometer)：REBS Q7.1 (Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA)。
7. 土壤熱流板(heat flux plate)：HFT3 (Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA)，埋設深度 5 公分。

所有感測器連接於 Campbell CR1000 資料蒐集器，系統程式依 Campbell 公司所提供加以修改。

三、潛勢能蒸發散量模式特性

1. Penman-Monteith 模式

依據 Penman-Monteith 之蒸發散量公式求取潛勢能蒸發散量(reference/potential evapotranspiration ; ETo)(Allen *et al.* 1998)。該公式由氣象資料經運算而得，氣象參數包括氣溫、相對濕度、兩公尺高之水平風速、淨輻射量及土壤熱流量等。

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{37}{T_{hr}+273}u_2\left(e^o(T_{hr}) - e_a\right)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)} \qquad (1)$$

ETo：潛勢能蒸發散量 (mm day^{-1})；Rn：淨輻射量(MJ m^{-2} day^{-1})；G：土壤熱流通量(MJ m^{-2} day^{-1})；Thr：每小時平均溫度(℃)；u2：2 公尺高度之風速(m sec^{-1})；(ea-ed)：飽和水汽與露點水汽壓差(kPa)；△：汽壓曲線斜率(kPa ℃$^{-1}$)；γ：溼度常數(0.66 kPa ℃$^{-1}$)。

2. Makkink 模式

Makkink (1957)利用輻射量所推導出草原地區的潛勢能蒸發散量，其模式為：

$$ET_O = 0.61\,(\triangle/\triangle+\gamma)(Rs/\lambda) \qquad (2)$$

其中 Rs：日照輻射能(cal cm^{-2} day^{-1})；λ：蒸發作用之潛熱(溫度 20℃時為 2.45 MJ kg^{-1})。

3. Hargreaves and Samani 模式

溫度是氣象資料中較為完整之因素，國內許多測站僅有溫度及降雨觀測，

Hargreaves and Samani 模式(1982)僅需溫度資料為輸入值。

$$ET_O = aRaTD^{1/2}(T+17.8) \quad (3)$$

其中 a 為參數(a= 0.0023)；TD 為每日最高溫及最低溫之差：Ra 為大氣圈外的輻射能(MJ m^{-2} day^{-1})。

4. Priestley and Tayler 模式

因 Penman 模式是在低海拔及潮濕環境所發展之模式，Priestley and Tayler(1972)將 Penman 模式加以簡化，以適用於不同氣象條件之環境，其模式為：

$$ET_O = 1.26\ (\triangle / \triangle + \gamma)(Rn\ /\ \lambda) \quad (4)$$

四、作物係數(kc)之估算

實際田間之蒸發散量是由土壤之蒸發量及作物葉片之蒸散量所組成，受作物不同生育階段之葉面積及土壤水分狀態之影響，一般將此稱為作物蒸發散量(crop evapotranspiration；ET_C)，不同於由氣象資料所估算之 ET_0 值。而作物係數(kc)即是 ET_C 和 ET_0 兩項之比值

$$ETc = kc \times ET_0 \quad (5)$$

五、統計分析

不同氣象因素之迴歸參數的檢測是利用均值相關統計方法，包括均值偏差(mean bias error; MBE)及均值平均根偏差(root mean square error; RMSE)兩種方式。

$$MBE= [\Sigma(Fi\ comp - Fi\ meas)]/n \quad (6)$$

$$RMSE= \{[\Sigma(Fi\ comp - Fi\ meas)^2]/n\}^{1/2} \quad (7)$$

Fi comp 指第 i 筆估計值，Fi meas 指第 i 筆實測值，n 為所有測定值數目。RMSE 值低表示估算正確率高；MBE 值若為正則為高估，為負則為低估。

結果與討論

一、水稻田水汽量變化與氣象因子之關係

本研究是利用實測方式探討水稻田蒸發散量之變化。田區水汽通量量測是利用氣體吸收不同光譜波長特性，配合三維風速計(主要為垂直風速)及極細熱電偶線為主要量測儀器，可同時偵測水稻群落上方之潛熱(latent heat)、可感熱(sensible heat)及二氧化碳通量(CO_2 flux)之變化。Brutsaert (1982)認為通量量測系統應具有感測器的反應時間夠快，平均時期夠長，以及偵測速度精確等條件。目前有關農田通量之量測間距為 0.1 秒(10 Hz)，作為量測渦流(eddy)之變化(Massman 2000)。Table 1 為三項通量測值和氣象因子間的相關性，由分析結果可知，潛熱和光強有極高相關性(R^2= 0.903)，其次為溫度及風速，至於大氣中相對濕度則相關性不高。可感熱及二氧化碳通量則除光強之外，其餘也皆不明顯。Berbigier *et al.* (2001)由長期森林量測資料發現，輻射量是重要因子，其與潛熱通量相關係數達 0.96，與每日蒸發量及二氧化碳通量同為 0.86。由此可知，光度瞬間值影響水汽及二氧化碳的通量。而由 2007 年太陽日 90 之日變化資料(Fig. 1)，更可說明潛熱與光強較溫度更有一致性。

目前我國水稻栽培之水分管理，除曬田時期外，大都以湛水方式存在。由於 Stannard (1997)認為水汽量測系統在相同條件下應比鮑溫比(Browen ratio)有更大的吹風距離，而一般認為比值應為 100：1 (Rosenberg *et al.* 1983)以避免植冠非均一性及風向的干擾。因此，觀測地點為面積 2 公頃之平整水稻田，資料記錄日期由 3 月 25 日至 7 月 3 日止。期間之日累積太陽輻射量及平均潛熱通量如 Fig. 2 所示，其中四月上旬及五月中旬有特別低之潛熱值，是因降雨時輻射量減少所致。由於潛熱受輻射量波動影響，整個期作資料無法和作物生育情形作比較，但如果以潛熱值除以輻射量所得到水分利用效率(water use efficiency)，則可解釋與葉面積(圖中箭頭所示之數值)之相關性。事實上，在水稻生育初期，分蘗數及葉片伸長面積較小，無法覆蓋所生育的區域，由上往下俯視可區分地表及葉面。此時地面蒸發大於葉片的蒸散，而整

Table 1. Relationships (coefficient of determination) between the energy fluxes and meteorological factors. Data derived from the first crop of rice in Chiayi in 2007

	Temperature ℃	PPFD[x] μmol m^{-2} s^{-1}	Relative humidity (%)	Wind speed m s^{-1}
Latent heat (Wm^{-2})	0.674	0.903	0.260	0.610
Sensible heat (Wm^{-2})	0.139	0.522	-0.082	0.156
CO_2 flux (mg m^{-2} s^{-1})	-0.317	-0.506	-0.095	-0.255

[x] PPFD: photosynthetic photon flux density.

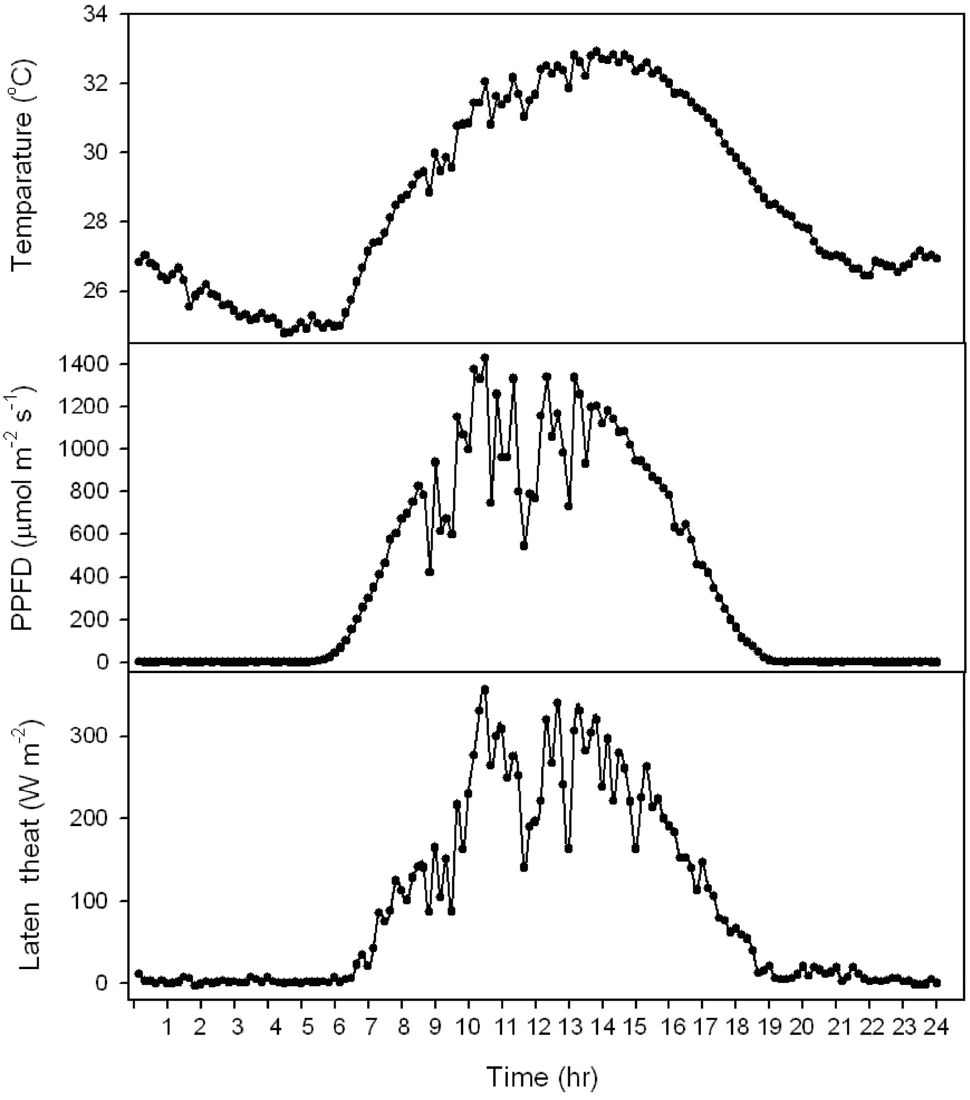

Fig. 1. Diurnal fluctuation of temperature, photosynthetic photon flux density (PPFD) and latent heat at calendar day 90 for rice grown in the first cropping season in Chiayi in 2007.

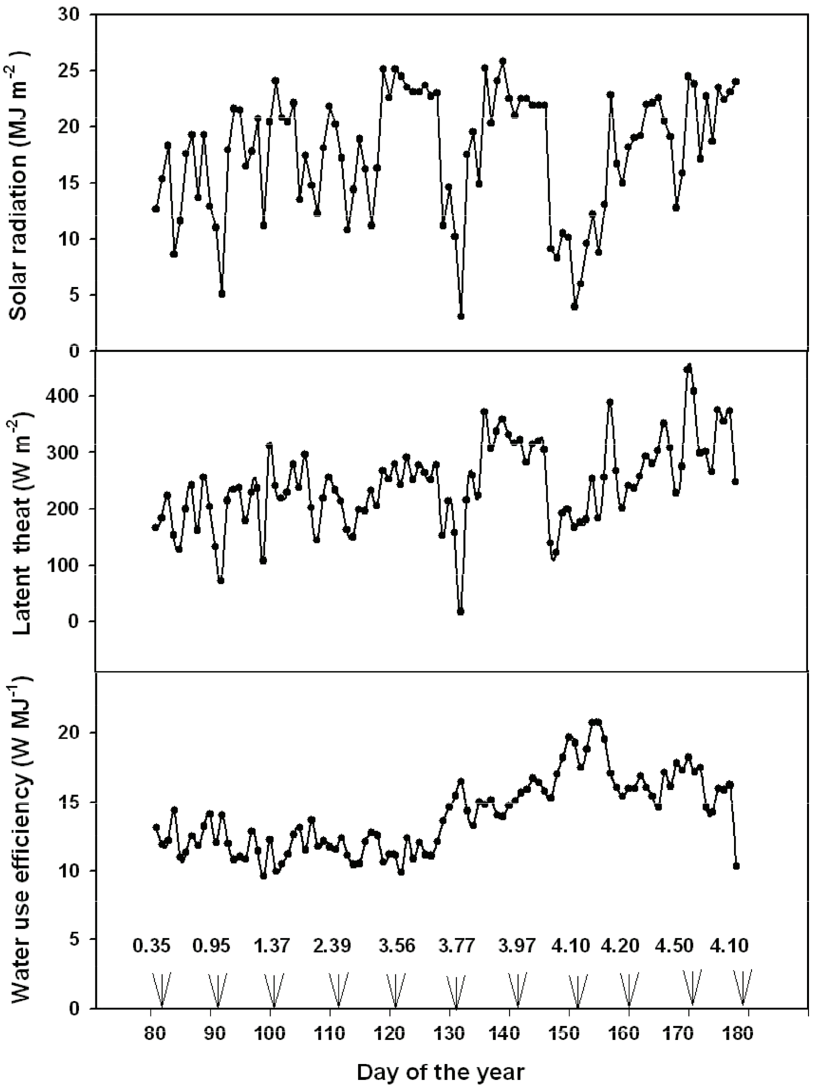

Fig. 2. Changes of solar radiation, latent heat and water use efficiency for rice grown in the first cropping season in Chiayi in 2007. Arrows indicate the leaf area index (LAI).

個潛熱主要以太陽光對地表水分加熱為主。隨生育時間的增長，覆蓋面積及植冠結構增厚，地面為葉面所覆蓋，此時葉片蒸散所佔潛熱比重增加。雖然就水稻耗水而言，蒸發或蒸散並無區分的必要，但在建構蒸散模式以估算耗水量時，包括葉面積、葉片蒸散(或氣孔導度)及地表蒸發量皆是模式建構所需的基本資料。前人研究顯示，葉面積指數介於 2-3 之間時，植冠垂直分布的差異明顯改變(Yao *et al*. 2003)，在葉片所形成植冠除減少上下對流外，同時也意味蒸散取代蒸發。而在水稻生育後期會因葉片黃化而降低葉面積，水分利用效率則逐漸降低。

二、蒸發散模式之比較

估算蒸發散量之模式相當多，雖有不同估算基準或目的，但大多以氣象資料為輸入值。當進行大面積估算，則需有密集的氣象

資料才能排除地域性差異。目前臺灣氣象資料分為中央氣象局之直屬測站、農業站、自動站及民用站等四種來源。以 2002 年為例，全國共有 1,117 個氣象站，其中雨量站(僅有雨量資料)為 879 個站，其餘之氣象站可依據來源分為局屬站 24 個，自動站 100 個，農業站 17 個，以及民用站 6 個，就設站之密度而言是相當密集。但不同模式需要的氣象資料並非所有氣象站皆有提供，以 Penmann-Monteith 模式所需氣象資料包括溫度(包括平均溫度，平均最高溫及平均最低溫)、輻射量及風速，目前僅有 47 站可提此項資料，然扣除高山測站外，僅有 41 個站有完整資料。而以臺灣西部臺中至臺南之主要農業生產區，有 2/3 水稻種植於此區域，但僅有 11 個氣象站可提供 Penmann-Monteith 模式所需氣象資料。因此，一些利用單一氣象因子所開發之蒸發散模式仍有利用之價值。雖然除溫度外，Allen *et al* (1998)提供其他參數的估算方法，但推估值並無法反應土壤或植生條件的差異，仍需以實測值校驗模式。

Kan *et al.* (1996)以氣象因子為基礎，將蒸發散模式分為五項，其中以溫度法、輻射法及組合法為最主要。本研究所用四種模式，Makkink 法(1957)及 Priestley-Taylor 法(1972)屬於輻射法，Hargreaves and Samani 法 (1982)屬於溫度法，而 Penmann-Monteith 法(1998)則屬於組合法，其中 Priestley-Taylor 法是由簡化 Penmann-Monteith 法參數而來。四種估算模式所估算之潛勢能蒸發散量(ET_O)，和由水稻田實測潛熱通量經作物係數校正之作物蒸發散量(ET_C)之相關性如 Table 2 所列。組合法之 Penmann-Monteitn 法仍具有極佳預測能力，相關係數可達 0.945。Hargreaves and Samani 法利用溫差所作估算會有高估現象，RMSE 及 MBE 皆在 4 以上。輻射法之模式預測力較溫度法為佳，但其中 Makkink 法有低估現象，MBE 值為 -3.012。Penmann-Monteitn 法及其簡化式 Priestley-Taylor 法，兩者之預測能力相近，RMSE 值皆在 1.2-1.5 之間。Fig. 2 是水稻一期作蒸發散量之實測及模式估算值之差異，其中溫度法雖然預測能力較差，但因模式有一參數項(a)可供調整。Yeh *et al.* (2005)在建立潛勢能蒸發散量經驗式之最佳化研究，曾將 Hargreaves and Samani 法之參數調整以符合其他模式所作之預測值，但參數受地域及植生條件所影響，日後利用此模式仍需再行估算。

三、水稻作物係數之探討

過去有關作物需水量都以模式估算，例如利用作物微氣象變化或氣候資料相關關係式進行估算，但大多以旱作物為主。Chen and Kan (1997)利用氣候資料針對我國十個主要地區進行水稻需水量的估算工作，所用 Penman-Monteith 估算法仍是以旱田作物所發展出來的模式，加上並沒有田間實測值，因此無法驗證。本研究由 2003 年水稻一期作至 2004 年二期作，共兩年四期作，利用水汽量測系統所測得潛熱，與同一時期由氣象資料所計算 Penman-Monteith 潛勢能蒸發散量(ET_0)作比較，可得到水稻田一、二期作之作物係數(Fig. 3)，箭頭所指為當時之葉面積指數。kc 值在初期較低，但仍較其他旱田作物在生育初期之 kc 值較高，主要是水稻移植在湛水環境，因此在一、二期作之生育初期之 kc 值分別為 0.92 及 1.01 (Fig. 4)。至於旱田作物在生育初期，向日葵為 0.52 (Tyagi *et al.* 2000)，番茄 0.65 (Amayren and Al-Abed 2005)。水稻田當 LAI 值大於 3.0 以上，此時整個植冠(canopy)形成，植冠垂直分布的差異明顯改變。在水稻生育中期葉片有旺盛蒸散作用，Kc 值在一期作為 1.13，二期作為 1.23。二期作在生育期間之 Kc 值較一期作為高，主要在於溫度高所致，溫度使能量增加，包括潛熱及可感熱。而在水稻生育後期會因葉片黃化而降低葉面積，kc 數值逐漸下降。雖然 Tyagi *et al.* (2000)在印度以滲

Table 2. Relationships (coefficient of determination) between the four evapotranspiration models and actual values, and their root mean square errors (RMSE) and mean bias error (MBE).

	Makkink	Priestley-Taylor	Hargreaves	Penman-Monteith
R^2	0.930	0.922	0.803	0.945
RMSE	3.242	1.264	4.380	1.548
MBE	-3.012	-0.458	4.157	-1.150

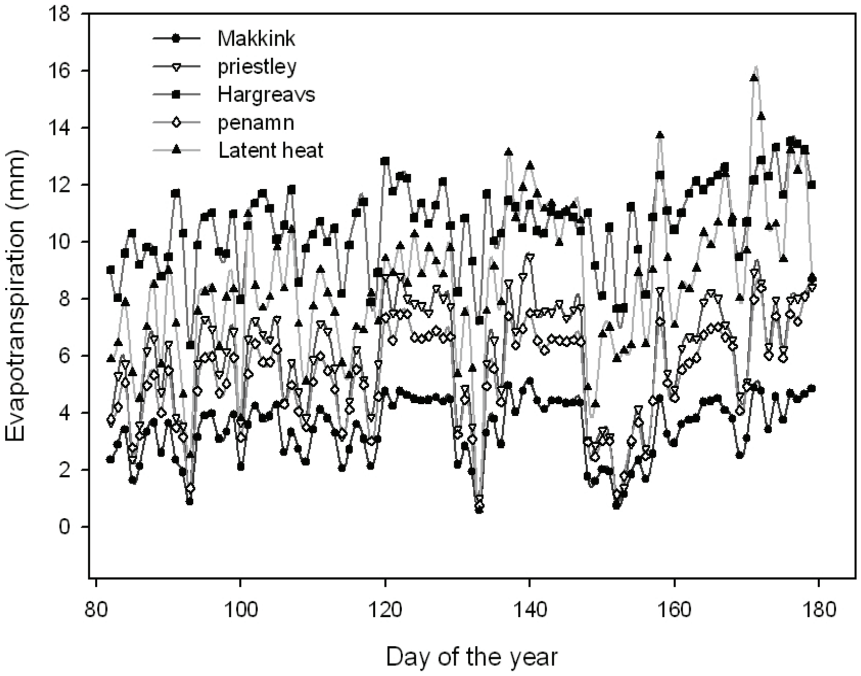

Fig 3. Comparisons between the four evapotranspiration models and latent heat for rice grown in the first cropping season in Chiayi in 2007.

漏計所量測之水稻 kc 值分別為 1.15、1.23、1.14 及 1.02，整個水稻生育期平均為 1.14，但由於該水稻試驗由移植至成熟之生長溫度維持在 28-30℃之間，然而我國兩期作之栽培，一期作溫度為 20℃至 27℃，二期作為 28℃至 23℃，溫度變化上有顯著差別，因此也難以比較 kc 值的差異。

作物係數是一項經驗參數，會受田間環境及作物本身之影響，不同栽培條件也會有不同之係數。Lovelli *et al.* (2005)量測甜瓜之 kc 值，發現人工設施之塑膠布溫室較田間栽培容易低估。事實上，Allen *et al.* (1998)認為作物係數受四種特性影響，包括(I)作物高度：影響空氣動力阻抗(aerodynamic resistance)項，即水汽渦流由作物傳至大氣；(II)作物-土壤之反射率(albedo)：反射率是由植株覆蓋和土壤表面所決定，影響淨輻射量，而該能量項是蒸發過程能量交換之主要來源；(III)群落阻抗：水汽由葉片之氣孔所蒸散，受葉面積、葉齡及環境的影響；(IV)土壤的蒸發。另在氣象因素中，風速增加改變作物空氣動力阻抗，因此在乾旱環境(低相對溼度)且風速強，則通常 kc 值較高。而 kc 量測也可由不同原理或方法進行，如滲漏計

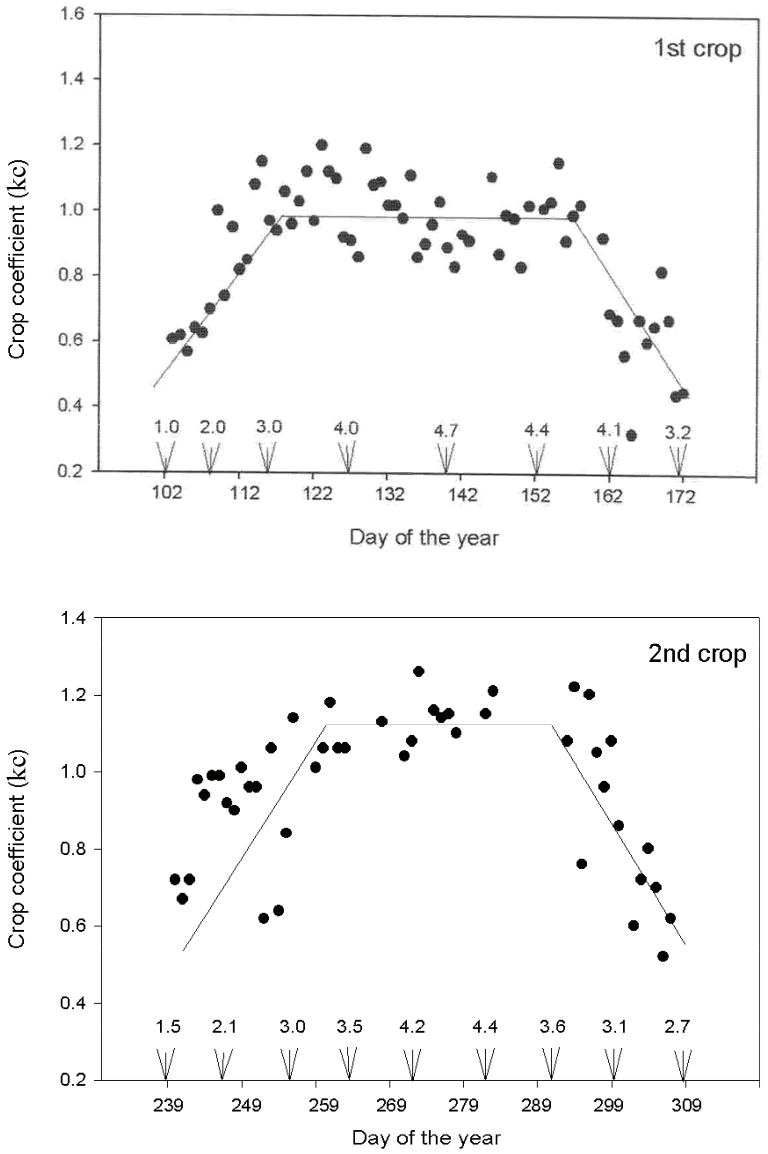

Fig. 4. Changes of the crop coefficient (kc) for rice grown in Taichung in the first and second cropping seasons of 2005. Arrows indicate the leaf area index (LAI).

(Tyagi *et al.* 2000)、Bowen ratio 能量平衡方式 (Inman-Bamber and McGlinchey 2003)、水汽量測系統 (Villalobos *et al.* 2004)，或是由其他參數推估，如利用 NDVI (normalized difference vegetation index) (Hunsaket *et al.* 2003)及衛星遙測方式 (Allen 2000)。本研究所用估算作物係數之潛熱值是實際田間測值，受氣象條件、土壤狀態、作物高度及葉面積指數等之影響。

結論

水稻是我國主要糧食作物，同時水稻栽培對於氣候調節及涵養水源具有永續經營的意義。但水稻田用水量約佔農業用水 70%以

上，在用水短缺時，如何更有效利用水資源是極重要課題。本研究利用水田能量平衡直接量測水稻生育期間之潛熱變化，潛熱受太陽輻射量影響，包括可感熱及二氧化碳通量皆同。另潛熱資料和不同蒸發散模式的校驗結果說明，由輻射量開發之模式的預測較為準確。此外，Penman-Monteith 估算法仍有最佳之預測，但針對需較多氣象資料輸入之模式，散佈在全國之氣象站是否能提供詳盡及完整之資料，尤其是平整之農業區，測站密度仍顯不足。因此，以單一氣象因子為輸入值之模式亦有其利用價值，但在使用前仍需校驗，並得到區域性參數才具有實用價值。另本研究由多年資料建立臺中地區水稻之本土性作物係數，可供估算水稻田蒸發散量之依據。但作物係數是一種經驗式，受地域性之氣象資料、土壤特性、作物生育階段等影響，仍需建立各地水稻栽培區所適用之作物係數，才能建更精確之需水量模式，供水資源管理策略的依據。

誌謝

本研究係執行農業長期生態研究計畫之部分成果，特別感謝本所嘉義分所溪口農場陳榮坤先生提供水稻通量量測之場地，特申謝忱。

引用文獻

Allen RG (2000) Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. **J. Hydrol.** 229:27-41.

Allen RG, LS Pereira, D Raes, M Smith (1998) Crop evapotraspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy. 300pp.

Allen RG, ME Jensen, RD Burman (1990) Evapotranspiration and irrigation water requirement. ASCE Manual and Report on Engineering Practice, No. 70. American Society of Civil Engineers, New York, USA. 123pp.

Amayreh J, N Al-Abed (2005) Developing crop coefficients for field-grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under drip irrigation with black plastic mulch. **Agric. Water Manage.** 73:247-254.

Berbigier P, JM Bonnefond, P Mellmann (2001) CO_2 and water vapour for 2 years above Euroflux forest site. **Agric. For. Meteorol.** 108:183-197.

Brustsaert W (1982) Evaporation into the Atmosphere. D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, Holland. 299pp.

Chen CT, CE Kan (1997) Estimate or region-wide crop water requirement in Taiwan area. (in Chinese with English abstract) **J. Chinese Agric. Engin.** 43:1-17.

Doorenbose J, WO Pruitt (1977) Guideline for predicting crop water requirement. FAO Irrigation and Drainage, Paper No. 24. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, Italy. 193pp.

Dugas WA, ML Heuer, HS Mayeux (1999) Carbon dioxide fluxes over bermudagrass, native prairie, and sorghum. **Agric. For. Meteorol.** 93:121-139.

Hargreaves GH, ZA Samni (1982) Estimation of potential evapotranspiration. **J. Irri. Drain. E-ASCE** 108:223-230.

Hunsaker DJ, PJ Pinter, EM Barnes, BA Kimball (2003) Estimating cotton evapotranspiration crop coefficients with a multispectral vegetation index. **Irrig. Sci.** 22:95-104.

Inman-Bamber NG, MG McGlinchey (2003) Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurement. **Field Crop Res.** 83:125-138.

Kan CE, CT Chen, KY Chen (1996) Study on the suitability of consumptive use estimation methods for Taiwan area. (in Chinese with English abstract) **J. Chinese Agric. Engin.** 42:8-19.

Kosugi Y, S Takanashi, H Tanaka, S Ohkubo, M Tani, M Yano, T Katayama (2007) Evapotranspiration over a Japanese cypress forest. I. Eddy covariance fluxes and surface

conductance characteristics for 3 years. **J. Hydrol.** 337: 269-283.

Liang JY, FC Lieu, S Geng, SL Lin (1997) A simulation study of Taiwan's evapotranspiration under weather change scenarios. (in Chinese with English abstract) **Meteorol. Bull.** 41:246-271.

Lovelli S, S Pizza, T Caponio, AR Rivelli, M Perniola (2005) Lysimetric determination of muskmelon crop coefficient cultivated under plastic mulches. **Agric. Water Manage**. 72: 147-159.

Makkink GF (1957) Testing the penman formula by means of lysimeter. **J. Instit. Water Engineers** 11:277-288.

Massman WJ (2000) A simple method for estimating frequency response corrections for eddy covariance systems. **Agric. For. Meteorol.** 104:185-198.

Priestlet CHB, RJ Taylor (1972) On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Rev.** 100:81-92.

Prueger JH, TJ Sauer, JL Hatfield (1998) Turbulence flux estimates of sensible and latent heat near shelterbelts during low wind conditions. **Trans. ASAE** 41:1643-1650.

Rosenberg NJ, BL Blad, SB Verma (1983) Microclimate：The Biological Environment. 2nd ed. John Wiley and Sons, New York. 315pp.

Scott PL, C Watts, JG Payan, E Edwards, DC Goodrich, D Williams, WJ Shuttleworth (2003) The understory and overstory partitioning of energy and water fluxes in an open canopy, semiarid woodland. **Agric. For. Meteorol.** 114:127-139.

Stannard DI (1997) A theoretically based determination of Bowen-ratio fetch requirements. **Boundary Layer Meteorol.** 83:375-406.

Swinbank WC (1951) The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. **J. Meteorol.** 8:135-145.

Tanner CB (1979) Temperature : Critique I. p.117-130. *In*：Controlled Environment Guidelines for Plant Research. Tibbits TW, TT Kozolowski *(eds.)* Academic Press, New York.

Tyagi NK, DK Sharma, SK Luthra (2000) Determination of evapotranspiration and crop coefficient of rice and sunflower with lysimeter. **Agric. Water Manage.** 45:41-54.

Villalobos FL, L Testi, R Rizzalli, F Orgaz (2004) Evapotranspiration and crop coefficients of irrigated garlic (*Allium sativum L.*) in a semi-arid climate. **Agric. water manage.** 64: 233-249.

Yao MH, JC Tsai, LS Liang (2003) Measurement of vertical profiles and fluctuations on meteorological factor within and above a rice canopy. (in Chinese with English abstract) **J. Agric. Res. China** 52:50-61.

Yeh HF, JF Chen, CH Lee (2005) Optimum comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration. (in Chinese with English abstract) **J. Chinese Agric. Engin.** 51:27-37.

－編輯：楊純明